Вестник Донского государственного технического университета. 2019. Т. 19, № 3. С. 214–220. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2019. Vol. 19, no. 3, pp. 214–220. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9.048:539.3 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-214-220

Метод конечных элементов в моделировании центробежно-ротационной обработки*

А. Н. Соловьев[1], М. А. Тамаркин[2], Нгуен Ван Тхо[3]**
[1,2,3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[3] Университет Хайфона, г. Хайфон, Социалистическая Республика Вьетнам

Finite element modeling method of centrifugal rotary processing***

A. N. Soloviev[1], M. A. Tamarkin[2], Nguyen Van Tho[3]**
[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[3] Hai Phong University, Hai Phong City, Socialist Republic of Vietnam

Введение. В современном производстве при выполнении финишных операций важную роль играет центробежно-ротационная обработка в среде абразива. Основные преимущества этого метода отделочно-зачистной обработки: высокая производительность, низкая себестоимость и широкие технологические возможности. В данном исследовании рассматривается процесс взаимодействия абразивной частицы с поверхностью детали в рамках статической контактной задачи теории упругости. При этом учитывается пластическая деформация в области контакта.

Материалы и методы. Абразивная частица (корунд) моделируется линейно упругим телом, модуль Юнга которого значительно больше, чем у обрабатываемого материала. Обрабатываемый материал (сталь) моделируется упруго пластическим билинейным телом с применением критерия пластичности Мизеса.

Результаты исследования. Выполнено конечноэлементное моделирование рассматриваемых конструкций в CAE-пакете ANSYS. Смоделирован процесс взаимодействия абразивной частицы и поверхности детали, проанализировано ее напряженно-деформированное состояние. Представлены результаты численных экспериментов, которые позволили установить, как распределяются эквивалентные пластические деформации при глубинах внедрения конуса 0,01 мм и 0,05 мм. Полученные данные, а также области значений пластической деформации более 1 % визуализированы в CAE-пакете ANSYS.

Обсуждение и заключения. Установлено, что эквивалентная пластическая деформация пропорциональна глубине внедрения (ГВ). Она достигает минимального значения 0,158 при ГВ = 0,01 мм, максимального 0,825 — при ГВ = 0,05 мм. Определены зависимости размеров области пластической деформации от ГВ для случаев, когда пластическая деформация превышает 1 %. При максимальном внедрении (0,05 мм) радиус деформации составляет 1 мм, глубина — 0,8 мм. На основе данных, полученных в результате проведенного исследования, могут быть выбраны параметры технологического процесса (скорость враще-

Introduction. In modern production, when performing finishing operations, centrifugal rotary processing in the medium of abrasive plays an important role. High productivity, low costs and extensive technological capabilities are the main advantages of these cleaning and finishing operations. This paper considers the process of abrasive particle – workpiece surface interaction within the framework of the static contact problem of the elasticity theory. Thus, plastic deformation in the contact area comes into account.

Materials and Methods. The abrasive particle (corundum) is simulated with a linearly elastic body, whose Young's modulus is significantly larger than that of the work material. The process material (steel) is simulated with an elastoplastic bilinear body using the von Mises yield criterion.

Research Results. Finite element modeling of the structures under consideration was performed in the ANSYS CAE package. The process of abrasive particle – workpiece surface interaction was simulated; its stress-strain state was analyzed. The results of numerical experiments are presented. They have determined how equivalent plastic strains are distributed at depths of the cone penetration of 0.01 mm and 0.05 mm. The data obtained, as well as the areas of plastic strain values of more than 1%, are visualized in the ANSYS CAE package.

Discussion and Conclusions. It is established that the equivalent plastic deformation is proportional to the depth of penetration (DP). It reaches a minimum value of 0.158 at DP = 0.01 mm, and a maximum of 0.825 at DP = 0.05 mm. The dependences of the plastic region sizes on DP are determined for cases when the plastic deformation exceeds 1%. At the maximum penetration (0.05 mm), the deformation radius is 1 mm, and the depth is 0.8 mm.

On the basis of the data obtained as a result of the conducted research, the parameters of the technological process (rota-



*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
**E-mail: solovievarc@gmail.com, tehn_rostov@gmail.ru, thonguyen239@gmail.com
***The research is done within the frame of the independent R&D.

ния, размер абразивной поверхности, масса абразивных частиц), которые влияют на взаимодействие между деталью и абразивной частицей. Рациональный выбор этих параметров позволит повысить эффективность обработ ки.

tional speed, size of the abrasive surface, mass of abrasive particles) that affect the workpiece – abrasive particle interaction can be selected. A judicious choice of these parameters will increase the processing efficiency.

Ключевые слова: центробежно-ротационной обработки, абразивная обработка, контактная задача, пластичность, метод конечных элементов.

Keywords: centrifugal rotary processing, abrasive treatment, contact problem, plasticity, finite element method.

Образец для цитирования: Соловьев, А. Н. Метод конечных элементов в моделировании центробежно-ротационной обработки / А. Н. Соловьев, М. А. Тамаркин, Нгуен Ван Тхо // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2019. — Т. 19, № 3. — С. 214−220. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-214-220

For citation: A.N. Soloviev, et al. Finite element modeling method of centrifugal rotary processing. Vestnik of DSTU, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 214−220. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2019-19-2-214-220

Введение. В современном производстве при выполнении финишных операций важную роль играет центробежно-ротационная обработка (ЦРО) в среде абразива. Основные преимущества этого метода отделочно-зачистной обработки: высокая производительность, низкая себестоимость и широкие технологические возможности. В данном исследовании рассматривается процесс взаимодействия абразивной частицы с поверхностью заготовки в рамках статической задачи теории упругости. При этом учитывается пластическая деформация в области контакта. Элемент абразивного зерна в виде усеченного конуса (точнее: круг меньшего диаметра этого конуса) взаимодействует с поверхностью детали. При этом следует учитывать трение и пластическую деформацию данной поверхности. Кинематические или силовые граничные условия применяются к кругу большего диаметра. В случае кинематических условий заданы нормальное и тангенциальное смещения окружности и ее вращение. В случае силовых условий задаются сила и момент. Исследуются поля напряжений и эквивалентных пластических деформаций вблизи области контакта.

Моделирование геометрии абразивной частицы центробежно-ротационной обработки. Сущность метода ЦРО состоит в том, что абразивные частицы 3 и обрабатываемые детали 4 (рис. 1 [1]) загружаются в рабочую камеру и приводятся во вращательное движение вокруг вертикальной оси таким образом, что вся масса загрузки приобретает форму тора [2, 3], в котором частицы движутся по спиральным траекториям.

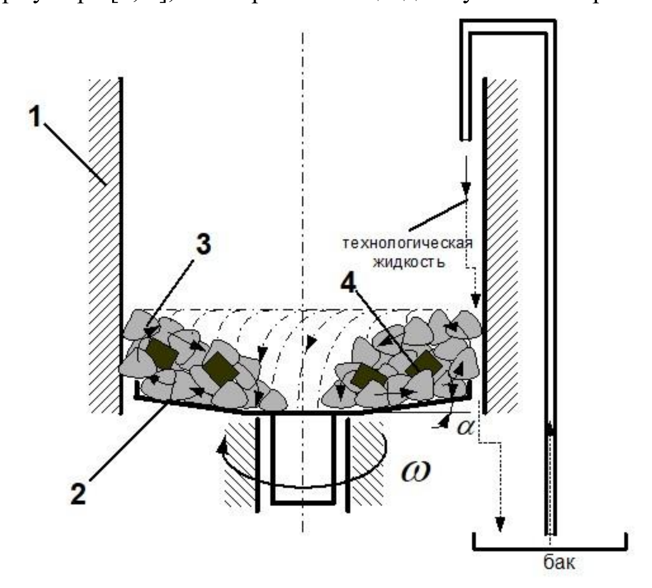


Рис. 1. Центробежно-ротационная обработка в среде абразива:
1 — неподвижная цилиндрическая обечайка; 2 — ротор; 3 — абразивное зерно; 4 — обрабатываемые детали

Тороидально-винтовой поток обеспечивается конструкцией рабочей камеры станка, состоящей из неподвижной цилиндрической обечайки 1 и примыкающего к ней вращающегося дна (ротора) 2, имеющего в распространенном варианте форму тарели. Детали 4 загружаются в рабочую камеру навалом вместе с абразивными частицами 3. Для уменьшения износа внутренние поверхности дна и неподвижной части рабочей камеры покрывают износостойким материалом. Чаще всего используются резиновые или полиуретановые покрытия.

Схема построения модели внедрения индентора в виде усеченного конуса предполагает сферическую форму абразивной гранулы с набором усеченных конусов [3]. Примерное представление о геометрии сферической абразивной частицы показано на рис. 2 [4].

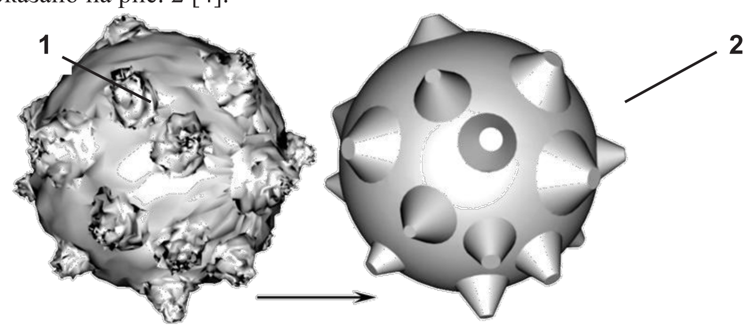


Рис. 2. Геометрия сферической абразивной гранулы: 1 — приближенная к реальной; 2 — моделируемая

Согласно модели, абразивное зерно имеет форму усеченного конуса. Такая модель позволяет учесть всегда имеющее место затупление абразивных зерен. На рис. 3 представлена схема взаимодействия абразивной частицы и детали [5].

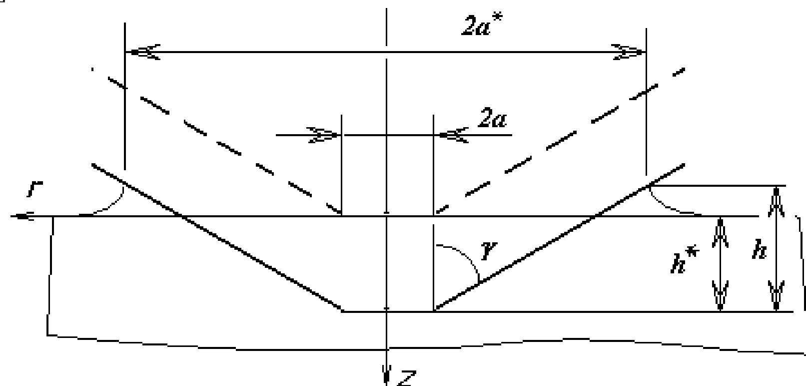


Рис. 3. Схема внедрения индентора в виде усеченного конуса

В силе, действующей на индентор, выделяют нормальную и касательную составляющие [2]. Согласно работе А. Н. Бескопыльного [5], нормальная составляющая силы резания равна:

$$P = \begin{cases} 2ah^* E^*, & h^* \le h^*_{cr} \\ \chi \left(\dfrac{h^* + C_1}{C} \right)^2, & h^* > h^*_{cr} \end{cases},$$

где $C = \left(1 - \delta^*\right) ctg(\gamma) + \chi \dfrac{(1 - 2/\pi)}{2E^*}$; $C_1 = a\left(1 - \delta^*\right) ctg(\gamma)$; δ^* — относительная высота наплыва;

E^* — приведенный модуль упругости; h^* — глубина внедрения зерна; $\chi = \dfrac{\pi}{2} \lambda \sigma_T$ — параметр пластичности.

Математическая модель. Оптимизация процесса истирания требует разработки усовершенствованных моделей фрикционного взаимодействия между абразивными частицами и поверхностью металлического компонента. В этой модели необходимо учитывать нагрев и износ поверхности из-за удара и скольжения абразивной частицы.

При абразивной обработке происходит контактное взаимодействие, приводящее с износу и разогреву поверхности обрабатываемой детали. Основные данные о процессах трения и износа представлены в [6]. Обработка в ротационной камере описана М. А. Тамаркиным и его учениками [1–5]. Особенностям этого процесса посвящены работы [7–9].

В представленной статье контактное взаимодействие абразивной частицы и поверхности детали рассматривается в рамках осесимметричной деформации фрагмента абразивной частицы с поверхностью обрабатываемой детали. Фрагмент абразивной частицы представляет собой усеченный конус, меньшее основание которого взаимодействует с поверхностью детали (рис. 4).

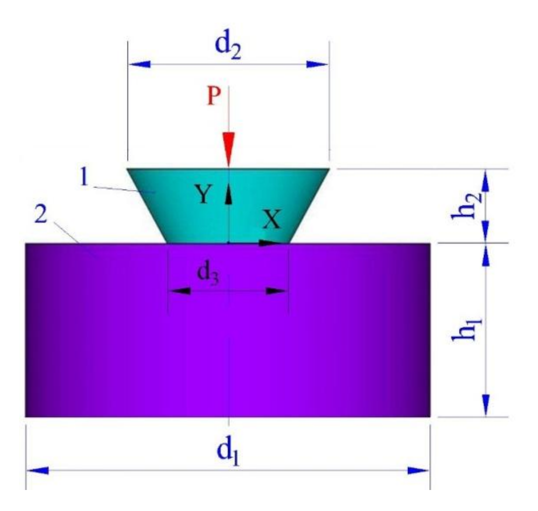


Рис. 4. Модель частицы и детали: 1 — абразивная частица; 2 — деталь

Согласно модели, абразивная частица (корунд) — это линейно упругое тело, модуль Юнга которого значительно больше, чем у обрабатываемого материала. Обрабатываемый материал (сталь) моделируется как упруго пластическое билинейное тело. При этом применяется критерий пластичности Мизеса [10].

Абразивная частица и деталь контактируют без трения. Контактными поверхностями являются верхняя плоскость детали, меньшее основание и боковая поверхность конуса. Нижняя плоскость и боковая поверхность детали закреплены по нормали. На большем основании усеченного конуса заданы граничные условия: силовые (равномерно распределенное давление) или кинематические (вертикальное перемещение). Рассматривается внедрение частицы в деталь, исследуются зона пластических деформаций и их максимальные значения.

Метод решения. Для решения описанных краевых задач используется метод конечных элементов, реализованный в CAE-пакете ANSYS. На рис. 5 представлена конечноэлементная сетка первой задачи.

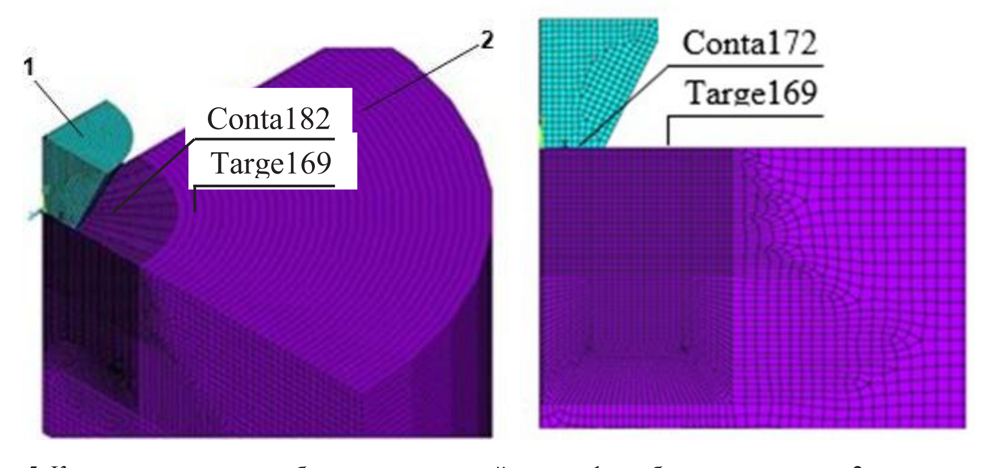
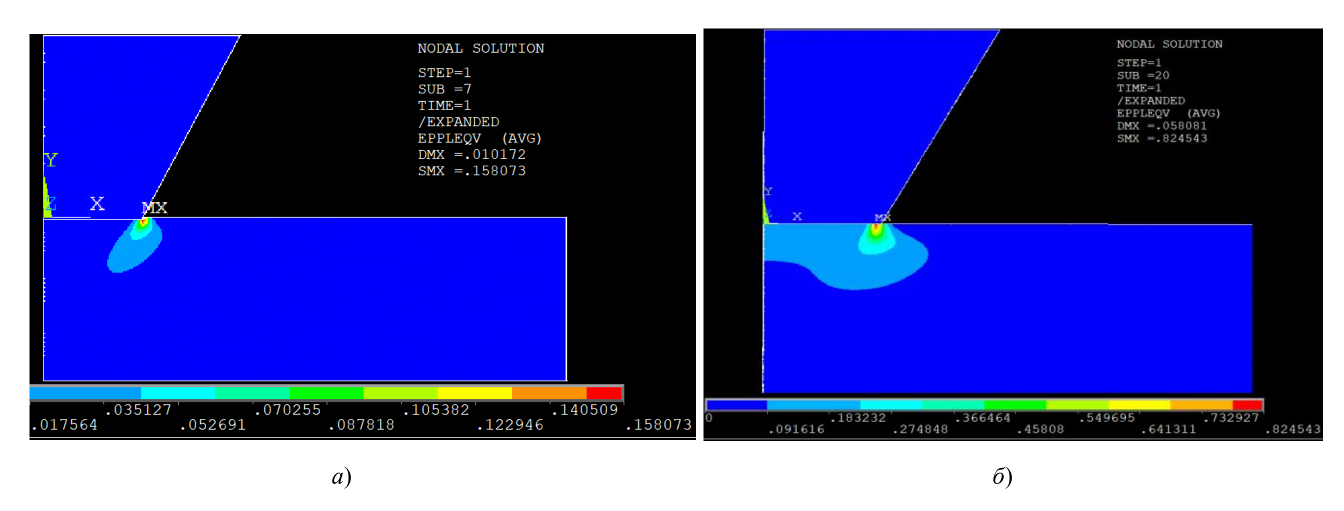


Рис. 5. Конечноэлементное разбиение в контактной задаче: 1 — абразивная частица; 2 — деталь

В области контакта и возможной пластической деформации выполнено сгущение сетки. Используются конечные элементы PLANE183 (материал 1), PLANE182 (материал 2) и TARGE169, CONTA172 для поверхностей контакта. Абразивная частица и деталь симметричны, поэтому исследуется половина осевого сечения (рис. 5).

Результаты численных экспериментов. В численных расчетах в задаче использовались следующие данные: радиусы усеченного конуса — 0,5 мм и 1 мм; высота конуса — 1 мм; радиус детали — 5 мм; толщина — 3 мм. Модуль Юнга материала 1 равен 2×10^6 ГПа; коэффициент Пуассона — 0,3. Модуль Юнга материала 2 равен 2×10^2 ГПа; коэффициент Пуассона — 0,28. Величина напряжения текучести — 0,22 ГПа. На рис. 6 представлено распределение эквивалентных пластических деформаций при глубинах внедрения конуса 0,01 мм (рис. 6 *а*) и 0,05 мм (рис. 6 *б*).



а) *б*)

Рис. 6. Распределение эквивалентных пластических деформаций при глубине внедрения конуса: 0,01 мм (*а*); 0,05 мм (*б*)

На рис. 7 показаны зависимости максимального значения эквивалентной пластической деформации от глубины внедрения (ГВ).

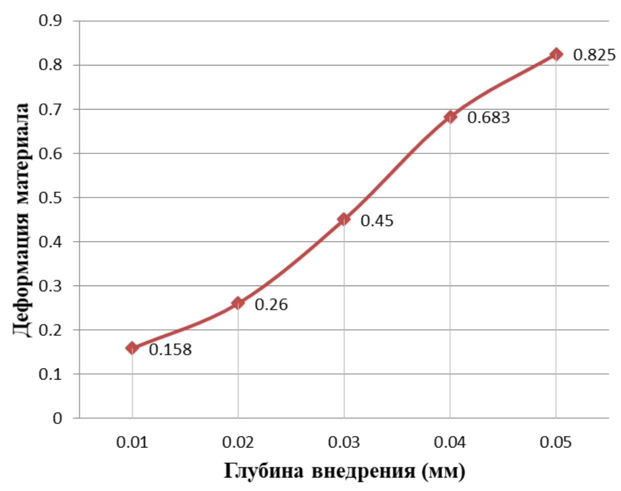


Рис. 7. Максимальные пластические деформации в зависимости от глубины внедрения

В ходе экспериментов по моделированию авторы обнаружили, что эквивалентная пластическая деформация пропорциональна глубине внедрения. Эквивалентная пластическая деформация достигает минимального значения 0,158 при ГВ = 0,01 мм, максимального 0,825 — при ГВ = 0,05 мм. Определены зависимости размеров области пластической деформации от глубины внедрения для случаев, когда пластическая деформация превышает 1 % (рис. 8–10). Области значений пластической деформации более 1 % выбраны с помощью программного обеспечения ANSYS. При этом определены глубина (H) и радиус (L) зоны деформации.

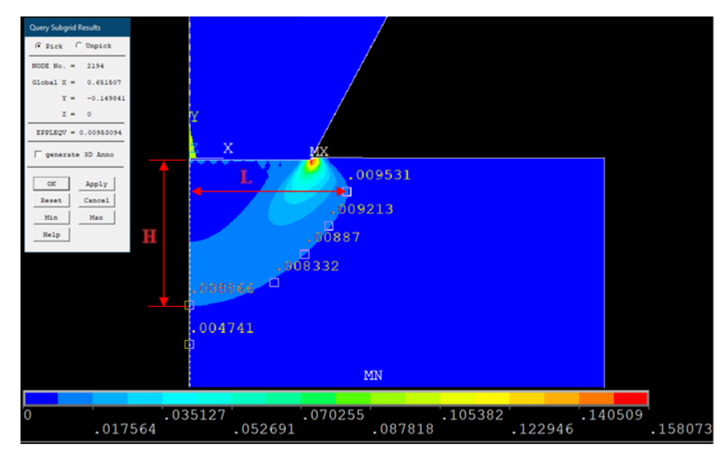


Рис. 8. Размеры области пластической деформации

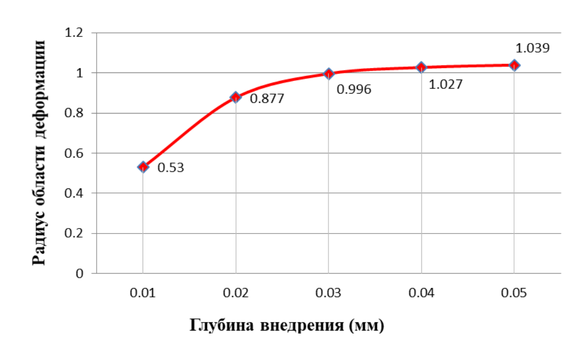


Рис. 9. Зависимость радиуса области пластической деформации от глубины внедрения

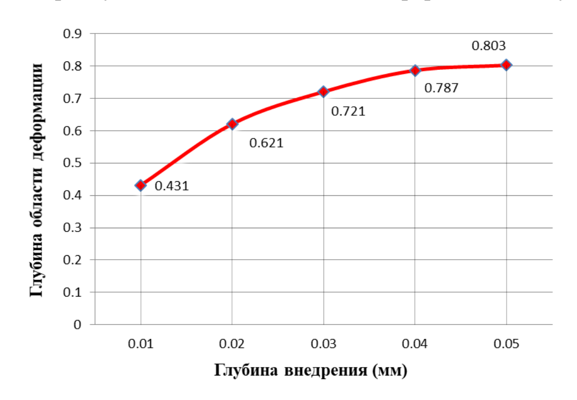


Рис. 10. Зависимость глубины области пластической деформации от глубины внедрения

Определена зависимость глубины внедрения конуса от равномерно распределенного давления, действующего на большее его основание. Эта зависимость представлена в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость глубины внедрения конуса от давления

Напряжение (Н/мм^2)	100	150	200	250	300
Смещение (мм)	–0,059	–0,119	–0,237	–0,354	–0,530

Результаты численных экспериментов позволяют определить зоны пластических деформаций и их величину в зависимости от глубины внедрения. А данные табл. 1 позволяют связать их с усилием, которое необходимо приложить к абразивной частице. Это усилие можно определить по параметрам технологического процесса.

Обсуждение и заключения. В настоящей работе выполнены:

— конечноэлементное моделирование процесса взаимодействия абразивной частицы с поверхностью обрабатываемой детали;

— проведен анализ напряженно-деформированного состояния поверхности.

Определена зависимость максимальной пластической деформации от глубины внедрения конуса (0,01 мм - 0,05 мм). Установлено, что эта величина меняется в пределах от 0,158 до 0,825.

Определены зависимости размеров области пластической деформации от глубины внедрения, для случаев, когда пластическая деформация превышает 1 %. При максимальном внедрении (0,05 мм) радиус деформации составляет 1 мм, глубина — 0,8 мм.

На основе этих данных могут быть выбраны параметры технологического процесса (скорость вращения, размер абразивной поверхности, масса абразивных частиц), которые влияют на взаимодействие между деталью и абразивной частицей. Рациональный выбор этих параметров позволит повысить эффективность обработки.

Библиографический список

1. Тамаркин, М. А. Исследование удаления металла при центробежно-роторной обработке в абразивной среде / М. А. Тамаркин, Э. Е. Тищенко, В. В. Друппов // Вестник Рыбинской гос. авиационной технологич. академии им. П. А. Соловьева. — 2007. — № 1 (11). — С. 169–186.

2. Теоретические и экспериментальные исследования процессов обработки фасонных поверхностей деталей свободным абразивом / М. А. Тамаркин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2011. — № 11. — С. 27– 31.

3. Тамаркин, М. А. Формирование параметров качества поверхности для центробежно-роторной обработки в абразивной среде / М. А. Тамаркин, Э. Е. Тищенко, В. В. Друппов // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2007. — № 10. — С. 19–23.

4. Корольков, Ю. В. Обеспечение надежности технологических процессов центробежно-ротационной обработки свободным абразивом // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — № 8. — С. 1247–1254.

5. Шведова, А. С. Обеспечение надежности технологического процесса центробежно-ротационной отделочно-упрочняющей обработки / А. С. Шведова, Д. В. Казаков // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — № 4. — С. 69–83.

6. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский // Москва : Машиностроение, 1968. — 480 с.

7. Grützmacher, Ph. G. The influence of centrifugal forces on friction and wear in rotational sliding / Ph. G. Grützmacher // Tribology International. — 2017. — № 116. — P. 256–263. DOI:org/10.1016/j.triboint.2017.07.021.

8. Theoretical and Simulation Analysis of Abrasive Particles in Centrifugal Barrel Finishing: Kinematics Mechanism and Distribution Characteristics / Wenhui Li [et al.] // Powder Technology. — 2017. — № 318. — P. 518–527. DOI:10.1016/j.powtec.2017.06.033.

9. Aurich, J. C. Sustainability of abrasive processes / J. C. Aurich, M. Hauschild, M. Carrella // CIRP Annals. Manufacturing Technology. — 2013. — № 62. — P. 653–672.

10. Finite Element Analysis of Traction Gear Using ANSYS / P. Silori [et al.] // Materialstoday Proceedings. — 2015. — Vol. 2. — P. 2236–2245. DOI. org/10.1016/j.matpr.2015.07.243

Сдана в редакцию 25.02.2019
Принята к публикации 05.04.2019

Об авторах:

Соловьев Аркадий Николаевич,
профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8465-5554
solovievarc@gmail.com

Тамаркин Михаил Аркадьевич,
заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9558-8625
tehn_rostov@mail.ru

Нгуен Ван Тхо,
научный сотрудник кафедры «Электротехника и машиностроение» Университета Хайфона
(Вьетнам, Хайфон, пл. Фан Данг Лыу, 117),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9105-7701
thonguyen239@gmail.com